水声定位导航技术的发展与展望

孙大军　郑翠娥*　张居成　韩云峰　崔宏宇

1 哈尔滨工程大学 水声技术重点实验室 哈尔滨 150001

2 中华人民共和国工业和信息化部 海洋信息获取与安全工信部重点实验室（哈尔滨工程大学）哈尔滨 150001

3 哈尔滨工程大学 水声工程学院 哈尔滨 150001

摘要　声波是迄今为止唯一有效的水下无线信息载体，水声定位导航是人类依赖众多水下航行器进入深海、探测深海和开发深海的关键。自“十五”计划以来，我国水声定位导航技术进入了快速发展期，从理论、技术到装备均取得了长足的进步。文章介绍了我国的相关技术发展历程及相关产业的现状，并探讨了面向新时期支撑和保障我国海洋利益诉求所需的水声定位导航技术手段与能力。

关键词　水声定位导航技术，发展现状，研究前沿

DOI　10.16418/j.issn.1000-3045.2019.03.011

水声定位导航技术是一种以基线的方式激励，通过测量声波传播的时间、相位、频率等信息实现定位与导航的技术。由于声波是迄今为止人类发现的水下唯一有效的信息载体，水声定位技术是目前水下目标定位与跟踪的主要手段。

根据定位系统基线长度以及工作模式的差别，一般将其划分为长基线系统、短基线系统、超短基线系统及综合定位系统[1-3]（表1）。① 长基线定位系统由预先布设的参考声信标阵列和测距仪组成，通过距离交汇解算目标位置。长基线需要事先测阵，作业成本高，主要应用于局部区域高精度定位。② 超短基线定位系统则是由多元声基阵与声信标组成，通过测量距离和方位定位。其优点为尺寸小、使用方便；缺点是定位误差与距离相关，仅适用于大范围作业区域跟踪。③ 短基线定位系统由装载在载体上的多个接收换能器和声信标组成，通过距离交汇获得目标位置。短基线作业简便，但其精度易受到载体形变等因素影响。④ 综合定位系统融合了超短基线及长基线定位，兼顾了超短基线作业的简便性和长基线的定位精度。

水声定位自 20 世纪 50 年代末正式登上历史舞台，已经经历了近 60 年的发展，至今产生出多种基于声学方式的定位原理与定位系统。尤其进入 21 世纪以来，

*通讯作者
资助项目：国家自然科学基金项目（61531012、61701132）
修改稿收到日期：2019年3月7日

随着对水声物理、水声信号处理技术研究的突破创新，水声定位系统的各种相关技术愈发成熟。国外已有 Sonardyne、IxSea、Kongsberg 等多家公司推出了多套高性能的商用乃至军用水声定位系列产品，标志着水声定位技术进入了相对快速的发展时期。虽然国内对水声定位研究起步较晚，但近年来在市场需求和政策引领之下，我国水声定位导航技术也进入了快速发展期。

1 国外技术发展现状

国外对水声定位系统的研究起步较早。相对于其他定位系统而言，国内外对长基线定位系统的研究均起步较早：1958 年美国华盛顿大学的应用物理实验室为美国海军建成了首个长基线水下武器靶场；20 世纪 70 年代末—80 年代初，美国华盛顿大学应用物理实验室再次为原位热传导实验研制了一种便携式的长基线定位系统，定位精度可达 10 m，可以实现对在水深 6 000 m，面积 150 km^2 内的水面（水中）目标进行定位跟踪[4]。1963 年出现了第一套短基线水声定位系统。超短基线定位系统出现的相对较晚，国外有关超短基线定位系统的报道最早见于 20 世纪 80 年代初。经过近 40 年的发展，现在已有多家公司推出了成熟的超短基线定位产品。目前国外从事水声定位导航技术及相关声呐设备生产的国际领先国家与机构如表 2。

随着电子信息及海洋技术等技术的发展，各种水

表 1　常规水声定位导航系统分类

类型	长基线	短基线	超短基线	综合定位
基线长度	100—6 000 m	1—50 m	＜1 m	—
简称	LBL	SBL	USBL/SSBL	LUSBL
作业方式				

表 2　水声定位导航技术领先国家与机构

机构	国家	技术与产品	优势应用领域
Sonardyne公司	英国	超短基线、长基线、综合定位	海洋油气田开发
Kongsberg公司	挪威	超短基线、长基线、综合定位	动力定位、潜器对接
Ixsea公司	法国	超短基线、长基线，声学/惯性一体化	深海科学考察
Nautronix公司	澳大利亚	超短基线、长基线、综合定位	海洋钻矿
ORE公司	美国	超短基线	低精度
ASCA公司	法国	水下GPS	水下搜救
Woods Hole海洋研究所	美国	潜载超短基线，声学/惯性一体化	潜器对接
Scripps海洋研究所	美国	静态厘米级定位技术	海底板块位移的测量
东京大学	日本	静态厘米级定位技术	海底板块位移的测量

声定位系统不再局限于军事上的应用，更加广泛地应用于民品。经过几十年的发展，发达国家的水声定位设备生产厂商已经开始推出系列化的水声定位导航货架产品，由最初的窄带定位模式的超短基线定位系统、长基线定位开始[5]，根据海洋调查、海洋工程要求的不断提高，逐步由单定位模式向综合定位模式融合转变，由声学定位转向声学定位集成惯性导航定位，信号体制由窄带转向宽带，由少量用户作业到区域内密集目标作业，由单一定位功能转向多功能集成，定位精度则由最初的几十米级向米级转变[2]。少数几家公司的产品占据了全球绝大部分的市场。

2 我国技术发展历程及应用情况

2.1 我国水声定位导航技术起源

与国外相同的是，我国水声定位导航技术研究亦起步于长基线定位系统，20 世纪 70 年代末，由杨士莪院士牵头完成的“洲际导弹落点测量长基线水声定位系统”为我国第一颗洲际导弹试验的准确落点提供了可靠的科学依据，就此拉开了我国水声导航定位技术发展的序幕①。此后哈尔滨工程大学、中国科学院声学研究所、东南大学、厦门大学、国家海洋局海洋技术研究所、中船重工第七一五研究所等多家单位在声学定位技术领域都进行过广泛研究[2,5]。

我国早期的水声定位技术主要以军事需求为主，如东南大学研制的 YTM 鱼雷弹道测量系统[6]、哈尔滨工程大学的“灭雷具配套水声跟踪定位装置”[7]等。自“十五”计划以来，随着国家在海洋科学、海洋工程等海洋领域的投入增加，水声定位导航的非军需求急剧增加。

2.2 深海高精度定位技术从零到“同船竞争”

2000 年，为了执行我国国际海域矿产勘探合同，“大洋一号”科学考察船引进了国际上首套 6 000 m 深水超短基线定位系统 POSIDONIA 6000。同年，科技部“863”计划海洋技术领域同步布局了“长程超短基线定位系统研制”项目跟踪该技术。该项目于 2006 年 5 月在南海进行了深海定位试验验证，作用距离达到 8 600 m，定位精度优于 0.3% 斜距②，超出预定要求。同时期，科技部布局的“水下 DGPS 高精度定位系统”研制成功，并在浙江省千岛湖进行了试验。试验结果表明，对于水深 45 m 左右的水域，动态定位精度小于 2 m，水下授时精度为 0.2 ms，且测量误差不随时间累积[8,9]。以上技术的发展填补我国在该领域的空白。

在 POSIDONIA 6000 超短基线定位系统在“大洋一号”船服役期间，存在技术封锁、费用高、设备维修困难等缺点，影响了超短基线定位系统在海洋资源勘测中的使用效果。基于核心技术不能受制于人以及给国产装备以应用机会的考虑，迈出推进国产水声定位导航装备实质性应用的第一步，在科技部和中国大洋协会的支持下，完全自主知识产权的深海高精度超短基线定位系统分别于 2012 年和 2013 年装备于“科学”号和“大洋一号”科考船，开始了与国外先进技术的“同船竞争”时期。随后，国产深海高精度超短基线定位系统陆续装备于“向阳红 09”科考船、“探索一号”科考船及某新型水面舰船。

在“同船竞争”期间，国产深海高精度超短基线定位系统交出了优异的成绩单，为我国 7 000 m 载人潜水器“蛟龙”号、深海缆控潜水器（ROV）“发现”号和深海水下声学拖体等多种水下潜器提供了水下精确定位服务，工作稳定性、数据质量有效性均优于同船国外设备。

2.3 高精度水声综合定位技术从“跟跑”到局部领先

面向我国海底矿产资源精细调查、勘探、开采的

① 杨士莪，百度百科（https://baike.baidu.com/item/%E6%9D%A8%E5%A3%AB%E8%8E%AA）。
② 哈工程长程超短基线定位系统项目填补国内空白（http://www.sxgfgb.gov.vn/MessageShow.asp?msgID=4919&pageID=1）。

作业需求，紧密结合7 000 m载人潜水器“蛟龙”号、“潜龙1号”水下无人机器人（AUV）、深海空间站等重大海洋装备与工程的亚米级定位需求，依托“科学”号科考船，科技部于“十二五”安排了“深水高精度水下综合定位系统研制”项目，发展相关的技术和设备，形成了一套具有自主知识产权水下综合定位系统样机，可以在7 000 m海深内提供高精度定位服务。

该样机于2015年起服役于“科学”号科考船，同年5月至7月参加了“2015马努斯热液-南海冷泉航次”，圆满完成了水下综合定位系统的海上验收，并为该航次的海底地形地貌测量、冷泉热液喷口发现等工作提供了水下优质可靠的定位信息。此次海试首次实现了深海超短基线和长基线有机结合的综合定位跟踪模式，在单周期内同步保障了水下平台的高精度导航和水面对水下平台的跟踪监视，定位精度优于0.5 m，并实现了国内首次成功完成复杂海山地形下精准可靠长基线作业，获取了我国首个亚米级冷泉热液地形地貌图。

在深海高精度水声综合定位系统引导下，我国“深海勇士”号载人潜水器2017年9月29日在南海3 500 m深处仅10 min就快速找到预定的海底目标，实现了“大海捞针”，这标志着我国深海高精度水声定位装备与技术达到国际领先水平。深海定位精度首次达到0.3 m、定位有效率超过90%，综合技术水平进入世界领先行列。成功支撑了刚刚结束的我国“深海勇士”号载人深潜首航试验和我国最先进科考船“科学号”南海综合调查科学考察2次任务，为我国开展万米深渊“马里亚纳海沟”科学探索等深海实践，奠定了坚实的技术与装备基础③。

面向我国重大发展战略需求的水声定位导航技术（图1），其主要需求特征体现在“深、远、精、多”，即“深海底、远距离、精度高、多用户”。经过“十五”至“十二五”3个五年计划的实施，我国的深海实践已经从4 500 m步进至7 000 m，目前11 000 m的深渊科学与技术正在如火如荼展开；作用距离由已达的8 000 m正在向12 000 m迈进；定位精度从几十米量级以进步至优于0.5 m，新的需求将精度要求提至10 cm；而可接入的目标数也从单目标定位到满足水下多作业平台的集群定位。我国水声定位导航技术已基本完成了“跟跑”，进入“并跑”的初级阶段，其中万米级高精度定位导航处于领跑阶段。

2.4 我国水声定位导航产业兴起

经过20年的努力，我国水声定位导航技术逐步缩小了与发达国家的差距，培养了国内用户对国产设备的信心，逐步由只使用国外设备转向更青睐于国内技术，并为我国水声定位导航产业的快速发展奠定了技术基础。近几年来，得益于国家政策引导和市场需求，水声定位导航行业涌现出一大批技术研发、生产及服务的厂家，如江苏中海达海洋信息技术有限公司、嘉兴易声电子科技有限公司、青岛明深信息技术有限公司、中国科学院声学研究所嘉兴工程中心、杭州瑞利科技有限公司、青岛海研电子有限公司、海声

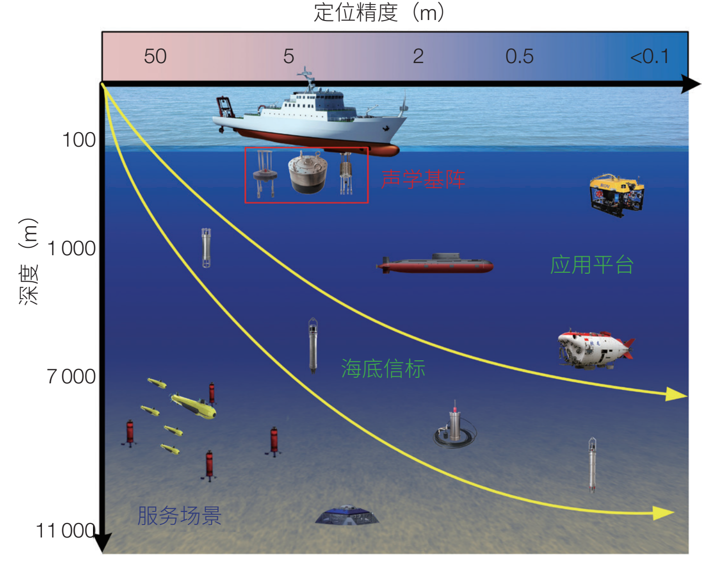


图1 水声定位导航技术发展历程

③ 2017年度“中国高等学校十大科技进展”项目评选揭晓（http://www.moe.gov.cn/jyb_xwfb/gzdt_gzdt/s5987/201712/t20171226_322489.html）。

科技等。与国外的厂商相比，国内技术提供方能够根据用户需求进行定制，并且快速响应，而且在后期的设备维护适用和技术支持上更具优势。

江苏中海达海洋信息技术有限公司自2014年以来逐步推出了iTrack系列的超短基线、长基线等水声定位产品④，其中iTrack UB 1000系统于2015年3月在长江上海段为中船勘察设计研究院有限公司的水下铺排施工检测项目提供了高精度排体定位服务。作业过程分两个阶段：第一阶段为铺排作业，采用超短基线定位对排体位置进行实时跟踪，指导施工；第二阶段为排布铺设结束后的排体位置后调查，采用长基线定位模式对排体在水下的最终位置进行高精度定位检测，定位精度达到0.5 m以内。

嘉兴易声电子科技有限公司以研发声学导航定位声呐及海洋环境测量声呐为主⑤，为海军研究院定制开发的eLBL型长基线定位系统，主要为水下KCJ试验实现水下目标精确定位，为试验组织指挥提供辅助决策，为试验结果分析、评定提供依据。2017年7月在莫干山水库完成系统湖试验证，系统定位精度达到0.3 m以内。2017年9月—2018年5月，在崇明长江口完成了多达50次的水下目标定位服务。在多次的定位试验过程中，该系统工作稳定可靠，成功为试验组织提供精确而可靠的定位数据。

青岛明深信息技术有限公司已完成哈尔滨工程大学水声定位导航技术的成果转化，在装船样机基础上，形成了系列化水声定位导航声呐货架产品⑥。产品之深海高精度水声综合定位系统集超短基线、长基线于一体，为水下潜器提供高精度定位服务，定位精度优于1 m、最大工作距离8 000 m、作业深度7 000 m，于2017年9月为中国科学院战略性先导科技专项“热带西太平洋海洋系统物质能量交换及其影响”南海综合考查航次提供高精度定位保障，作业区域深度1 200 m，动态定位精度优于0.5 m，定位有效率高、可靠性好，保障了调查任务的顺利实施。

3 面向新时期我国水声定位导航的研究前沿

3.1 走向更深更远的全海深水声定位导航技术

近年来，深渊科学正成为海洋科学中蕴含重大突破的最新前沿领域，深渊探测装备技术亦成为国际海洋科技竞争的焦点[10]。“十三五”期间，科技部部署了国家重点研发计划“深海关键技术与装备”重点专项“全海深潜水器研制及关键技术攻关”项目群，其中就包括“全海深潜水器声学技术研究与装备研制”项目，以开展全海深潜水器声学设备研制，解决全海深潜水器定位及声学通信技术，支撑“十三五”重点研发计划中全海深载人潜水器和无人潜水器的研制。全海深水水声定位技术难在深，难在远，其工作深度不小于11 000 m，最大作用距离超过12 000 m，对高耐压换能器设计、弱信号检测技术、高精度阵列误差补偿及高精度长信号累计方位估计等关键技术提出了严峻的挑战。

3.2 面向水下无人航行器集群作业“互联、互通、互操作”的水下动态网络定位

近年来，随着水下无人航行器技术及水声通信技术的发展，水下无人航行器集群作业在海洋环境监测、海洋资源开发与利用及海洋国防安全等领域呈现出重要潜在应用价值[11]。而水下无人航行器间的“互联、互通、互操作”能力是多平台协同作业的基础。快速精确水声动态网络定位和可靠水声通信是“互联、互通、互操作”的核心。面对这一由海洋环境监测、海洋资源开发和海洋权益维护对水下传感器网络定位及通信提出的重大需求，国家自然基金委

④ http://www.hi-marine.com.cn/a/pd/self/column5/2014/0822/66.html.
⑤ http://esonar.com.cn/.
⑥ http://www.deep-trans.com.

于2014年和2015年连续2年建立重点项目群“分布式水声网络定位与探测基础研究”和“面向移动节点的水声传感器网络基础研究”来开展相关基础科学问题研究。受水下传感器网络带宽有限、能量有限、信道条件差、声速慢等因素制约，目前还缺乏适应快速、精确、大范围需求的定位方法，有效的评价机制，以及定位协议等。

此外，在弱联通条件下，声学/惯性一体化导航定位是新的技术增长点。惯性导航技术能够连续地输出姿态、速度、位置等信息，具有短时精度保障能力，但其误差会随时间发散；水声定位技术能够获得无累积误差的位置信息，但是受海洋声传播特性的影响，存在数据更新慢、容易受多途及突发性噪声干扰出现无效数据的缺点。水声/惯性一体化导航定位则能够兼得两者的优点，可有效抑制导航系统位置误差的发散，适合于水下高精度长航时导航定位。但与其他组合导航模式相比，受复杂海洋环境的影响，水声定位导航的观测数据存在着高延迟、低数据率、低有效性等特点，使得水声/惯性一体化定位导航技术目前还刚刚处于起步阶段。

目前水下无人潜水器集群定位还处于初级阶段，以理论研究为主，实践较少，亦缺乏验证平台，需建立完善的水下动态网络定位通信技术体系，为未来我国水下无人航行器集群作业“互联、互通、互操作”奠定理论与技术基础。

3.3 建设海底大地测量基准，支持中国国家综合PNT体系建设

杨元喜院士指出，“未来我国要构建无处不在的定位导航授时服务体系，从深空到海底无处不在的PNT服务，要构建这样的体系。未来的发展要将构建全球统一的、高精度、高密度坐标框架，包括海岛礁和海底框架点，便于大数据的研究与应用”[12]。海洋大地测量基准是海洋环境信息的基本参考框架，是谋划、决策、规划和实施一切国家海洋战略的重要基础[13]。相较于较为完善的陆基大地基准，我国高精度海底基准控制点建设尚处于空白，与国际先进水平存在较大差距。

“北斗”卫星导航系统总设计师杨长风指出，按需发展水下导航系统是中国国家综合PNT（定位、导航、授时）体系建设重点五大基础设施之一，到2035年完成水下的PNT技术试验应用，完成以“北斗”为核心、基准统一、覆盖无缝、安全可信、高效便捷的国家综合PNT体系建设，提供体系化的PNT服务⑦。海底大地测量基准是综合PNT体系的重点与难点，需要重点解决海洋大地测量基准建立、海洋垂直基准实现与三维基准传递、水下基准建设、海洋及水下无缝导航与位置服务等技术瓶颈问题[14]。

为配合建设以“北斗”为核心的国家综合PNT体系，建立覆盖我国海洋和我国利益诉求海域的长期布放于海底大地测量基准是其重要的战略保障。本着从无到有，从有到精，由点及线，由近及远，由浅到深的循序渐见发展思路，海底大地测量网的研究与建设必将像“北斗”卫星定位系统影响一样，并将为海洋领域科学技术与产业的发展带来新的活力。

4 结语

水声定位导航技术贯穿于几乎全部海洋科学及海洋工程活动，我国虽较国外起步晚，但经过十几年的努力，相关技术获得了长足的进步，已经逐步由“跟跑”进入“并跑”的初级阶段。“十二五”期间我国的水声定位导航技术还处于前期关键技术与样机研制与验证阶段，虽然已经开始出现由国际产品转向国内技术寻求帮助，但市场总体对国产仪器的信心不足，因而主要研究模式是高等院校与科研院所以项目

⑦ 北斗总师：2035年完成下一代北斗系统星座组网（http://www.chinanews.com/gn/2018/05-27/8523949.shtml）。

方式进行，市场刺激不够，研发周期较长，成果转化较慢。而随着国产技术在“十二五”期间的“同船竞争”的优异成绩和“海洋强国”国策的推进，前期的科研成果在“十三五”期间开始间快速转化，并通过引入惯性导航、大地测绘等学科交叉融合不断地拓展内涵。

最后，虽然目前我国水声定位导航技术产业化进程已进入快速发展期，但仍缺少成熟度更高、操作更人性化的水声定位产品，尚无法改变国内市场被国外生产厂商大幅占据的现实。只有通过加快产业化，降低成本，同时提升设备性能与稳定度，加强技术服务，才能从根本改变现状。

参考文献

1 钱洪宝, 孙大军. 水声定位系统现状. 声学技术, 2011, 30(3): 389-391.

2 孙大军, 郑翠娥, 钱洪宝, 等. 水声定位系统在海洋工程中的应用. 声学技术, 2012, (2): 125-132.

3 田坦. 水下定位与导航技术. 北京: 国防工业出版社, 2007: 1-5.

4 米尔恩 P H. 水下工程测量. 肖士石, 陈德源, 译. 北京: 海洋出版社, 1992.

5 郑翠娥. 超短基线定位技术在水下潜器对接中的应用. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.

6 生雪莉. 被动式三维水声定位技术研究. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2001.

7 吴永亭, 周兴华, 杨龙. 水下声学定位系统及其应用. 海洋测绘, 2003, 23(4): 18-21.

8 “863”计划“水下GPS高精度定位导航系统”课题组. 我国首套水下GPS高精度定位导航系统简介. 中国水利, 2004, (3): 52-53.

9 李薇. 水下GPS高精度定位导航系统取得阶段性成果. 应用技术, 2004, (1): 34.

10 中国科学院海斗深渊前沿科技问题研究与攻关战略性先导科技专项研究团队. 开启深渊之门——海斗深渊前沿科技问题研究与攻关先导科技专项进展. 中国科学院院刊, 2016, 31(9): 1105-1111.

11 石剑琛. 无人系统在未来海战场中的应用构想. 舰船电子工程, 2017, 37(12): 5-8, 58.

12 杨元喜. 未来我国要构建无处不在的定位导航授时服务体系. [2017-06-15]. http://www.3snews.net/bddsj/331000046168.html.

13 李林阳, 吕志平, 崔阳. 海底大地测量控制网研究进展综述. 测绘通报, 2018, (1): 8-13.

14 杨元喜, 徐天河, 薛树强. 我国海洋大地测量基准与海洋导航技术研究进展与展望. 测绘学报, 2017, 46(1): 1-8.

Development and Prospect for Underwater Acoustic Positioning and Navigation Technology

SUN Dajun ZHENG Cuie* ZHANG Jucheng HAN Yunfeng CUI Hongyu

（1 National Key Laboratory of Underwater Acoustic Science and Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2 MIIT Key Laboratory of Marine Information Acquisition and Security, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

3 College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China）

Abstract So far, the sound wave is the only effective carrier of transmitting underwater information. Underwater acoustic positioning and navigation is the key technology for human beings to enter, explore, and develop the deep ocean relying on underwater vehicles. Since the 10th Five-Year Plan, the underwater acoustic positioning and navigation technology has made a rapid development in China, which characters a considerable progress from the theory and technology to equipments. This paper introduces the development about this technology and the status about such related industries in China. Moreover, it also discusses the wanted means and capabilities about the underwater acoustic positioning and navigation technology to support and protect China's marine interests in the new era.

Keywords underwater acoustic positioning and navigation, development status, research frontier



孙大军 哈尔滨工程大学教授，博士生导师。中央军委科学技术委某领域首席科学家，中国声学学会理事，水声技术重点实验室、水中军用目标特性重点实验、教育部水声通信与海洋信息技术重点实验室、中国科学院声学智能自导与控制国防科技创新重点实验学术委员。主要研究领域包括：水下定位与导航、水声探测等。E-mail: sundajun@hrbeu.edu.cn

SUN Dajun Professor, Doctoral Supervisor of Harbin Engineering University. He received the B.Sc., M.Sc. and Ph.D. degrees in underwater acoustic engineering from Harbin Engineering University, Harbin, China, in 1994, 1996, and 1999, respectively. He worked at the Harbin Engineering University from 1996 to 2001, and then visited the National University of Singapore as a visiting scholar from 2001 to 2002. He became a Professor in 2007. His research focuses on sonar system design and application research, including long/short-baseline localization sonar, Doppler velocity log, communication sonar, submerged buoy systems, and imaging sonar. E-mail: sundajun@hrbeu.edu.cn



郑翠娥 哈尔滨工程大学副教授，博士生导师。主要研究领域包括：水下定位与导航、水声信号处理等。E-mail: zhengcuie@hrbeu.edu.cn

ZHENG Cuie Associate Professor, Supervisor for graduates for Master degree, Harbin Engineering University. Her research interests cover the algorithms and applications of underwater acoustic localization and navigation, and acoustic signal processing. E-mail: zhengcuie@hrbeu.edu.cn

■责任编辑：岳凌生

*Corresponding author

参考文献（双语版）

1 钱洪宝, 孙大军. 水声定位系统现状. 声学技术, 2011, 30(3): 389-391.

Qian H B, Sun D J. The status quo of underwater acoustic positioning systems. Technical Acoustics, 2011, 30(3): 389-391. (in Chinese)

2 孙大军, 郑翠娥, 钱洪宝, 等. 水声定位系统在海洋工程中的应用. 声学技术, 2012, 31(2): 125-132.

Sun D J, Zheng C E, Qian H B, et al. The application of underwater acoustic positioning systems in ocean engineering. Technical Acoustics, 2012, 31(2): 125-132. (in Chinese)

3 田坦. 水下定位与导航技术. 北京: 国防工业出版社, 2007: 1-5.

Tian T. Underwater Positioning and Navigation Technology. Beijing: National Defense Industry Press, 2007. (in Chinese)

4 米尔恩 P H. 水下工程测量. 肖士石, 陈德源, 译. 北京: 海洋出版社, 1992.

Milne P H. Underwater Engineering Surveys. Translated by Xiao S S, Chen D Y. Beijing: China Ocean Press, 1992. (in Chinese)

5 郑翠娥. 超短基线定位技术在水下潜器对接中的应用研究. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.

Zheng C E. Application of USBL positioning technology on underwater submersible interfacing. Harbin: Harbin Engineering University, 2008. (in Chinese)

6 生雪莉. 被动式三维水声定位技术研究. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2001.

Sheng X L. Research on passive 3D underwater acoustic positioning technology. Harbin: Harbin Engineering University, 2001. (in Chinese)

7 吴永亭, 周兴华, 杨龙. 水下声学定位系统及其应用. 海洋测绘, 2003, 23(4): 18-21.

Wu Y T, Zhou X H, Yang L. Underwater acoustic positioning system and its application. Hydrographic Surveying and Charting, 2003, 23(4): 18-21. (in Chinese)

8 “863”计划“水下GPS高精度定位导航系统”课题组. 我国首套水下GPS高精度定位导航系统简介. 中国水利, 2004, (3): 52-53.

Study Group of First Set of Underwater GPS High-precise Positioning Navigation System. A brief introduction of first set of underwater GPS high-precise positioning navigation system. China Water Resources, 2004, (3): 52-53. (in Chinese)

9 李薇. 水下GPS高精度定位导航系统取得阶段性成果——我国首套水下GPS高精度定位导航系统简介. 遥感信息, 2004, 19(1): 34.

Li W. Underwater GPS high-precision positioning system has achieved phased results—China’s first underwater GPS system has been successfully tested in lakes. Remote Sensing Information, 2004, 19(1): 34. (in Chinese)

10 中国科学院海斗深渊前沿科技问题研究与攻关战略性先导科技专项研究团队. 开启深渊之门——海斗深渊前沿科技问题研究与攻关先导科技专项进展. 中国科学院院刊, 2016, 31(9): 1105-1111.

Team of Strategic Priority Program of on Frontier Study on Hadal Science and Technology. Open a door to the Hadal trenches—Progress on frontier study on Hadal science and technology. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2016, 31(9): 1105-1111. (in Chinese)

11 石剑琛. 无人系统在未来海战场中的应用构想. 舰船电子工程, 2017, 37(12): 5-8.

Shi J C. Conception of unmanned system and application in future sea war field. Ship Electronic Engineering, 2017, 37(12): 5-8. (in Chinese)

12 杨元喜. 未来我国要构建无处不在的定位导航授时服务体系. [2017-06-15]. http://www.3snews.net/bddsj/331000046168.html.

Yang Y X. China will build a ubiquitous positioning navigation

and timing service system in the future. [2017-06-15]. http://www.3snews.net/bddsj/331000046168.html. (in Chinese)

13 李林阳, 吕志平, 崔阳. 海底大地测量控制网研究进展综述. 测绘通报, 2018, (1): 8-13.

Li L Y, Lyu Z P, Cui Y. Summary of the research progress of seafloor geodetic control network. Bulletin of Surveying and Mapping, 2018, (1): 8-13. (in Chinese)

14 杨元喜, 徐天河, 薛树强. 我国海洋大地测量基准与海洋导航技术研究进展与展望. 测绘学报, 2017, 46(1): 1-8.

Yang Y X, Xu T H, Xue S Q. Progresses and prospects in developing marine geodetic datum and marine navigation of China. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(1): 1-8. (in Chinese)